气候变暖背景下山西区域地表干湿状况变化①

张国宏， 张冬峰， 赵永强， 田国珍， 安 炜
（山西省气候中心，山西 太原 030006）

摘 要：利用1961—2017年山西省67个台站观测资料和FAO Penman-Monteith模型，运用统计学方法，研究了山西省近57 a地表干燥度的时空变化，分析了干湿区界限的年代际波动和面积变化，探讨了影响本区域干燥度的主要影响因素，结果表明：以年干燥度指数2.0为标准，山西全省可划分为半干旱和半湿润2个分区，其分区与植被覆盖度十分吻合；山西省北部和东南部地区呈变湿趋势，2000年之后尤为明显，而西南部大部为变干趋势；干燥度指数在1960—1990年代呈波动上升趋势，之后呈下降趋势；降水量在1990年代前呈下降趋势，之后呈上升趋势；蒸散量的变化分3个阶段，1960—1970年代为上升趋势，1980—2000年代较为稳定，之后呈增加趋势；干湿区界限经历了1960—1990年代的东南向位移和之后的西北向位移2个阶段，相应的干旱区面积占总面积的比例由52%扩展到73%，之后缩减到23%；降水量和蒸散量均同干燥度有显著相关性，且降水量同干燥度的相关性大于蒸散量，而相对湿度、平均风速和日照时数同干燥度相关不显著，但同蒸散量显著相关，最高和最低气温同干燥度或蒸散量的相关性均不显著；晋西北沙漠化年代际变化趋势与干燥度变化趋势一致，干湿状况是晋西北沙漠化变化趋势的重要影响因子。

关 键 词： FAO Penman-Monteith；干燥度；气候；山西
文章编号

全球气候变暖已是得到普遍认可的事实。根据IPCC第五次评估报告[1]，全球平均表面气温已上升了0.85 ℃（1880—2012年）；2018年4月3日，《中国气候变化蓝皮书》发布，1951—2017年中国地表年平均气温平均每10 a升高0.24 ℃，升温率高于同期全球水平，其中北方增温速率大于南方，西部大于东部[2]。在气候变暖背景下，水循环和水资源的分布会发生变化，从而引起气候干湿状况变化。气候干湿变化规律的研究对经济社会有针对性地利用气候资源、趋利避害、适应气候变化以及气候区划等具有重要意义[3-6]。

某地的干湿状况与降水量和蒸发量的比值密切相关，通常采用干燥度指数或湿润度指数反映[7]。目前，蒸散量的计算方法主要有3种，分别为Thomthwaite方法、Penman-Menteith方法以及Holdridge方法[8]。Penman-Monteith方法考虑了植被生理特征，以能量平衡和水汽扩散理论为基础，同时大量的试验结论表明在世界范围用其计算的参考作物蒸散与实测值最为接近，1998年FAO将Penman-Monteith公式确定为计算参考作物蒸散的标准方法[9]，这里的参考作物为一种假想作物，有诸多假设。

近几十年来，许多学者对中国或北方的干湿状况进行过研究[10-13]。马柱国等[14]研究表明，1951—1997年中国西北西部和华北地区变化趋势基本相反，前者地表为变湿趋势，后者为变干趋势；史建国等[15]研究显示，1957—2001年黄河流域干燥度总体呈增大趋势，多年平均干燥度空间分布格局受气候、地形地貌等多种因素的影响，具有明显的地域性差异；张红丽等[16]研究表明，近一个多世纪以来，中国东部整体呈现变干趋势，20世纪60年代之后干旱化趋势更加明显，且北方气候干燥程度对降水的依赖性更强；胡子瑛等[17]研究显示1960—2014年中国北方地区整体呈变干趋势，并表现出湿润区和半湿润区呈干旱化趋势，而干旱区和半干旱区呈

① **收稿日期：**2019-01-06； **修订日期：**2019-06-21
基金项目：中国气象局预报员专项（CMAYBY2019-016）；中央引导地方科技发展专项（ZY18C12）；国家重点基础研究发展计划（2017YFA0603701）；国家重点研发计划（2018YFC1505604）资助
作者简介：张国宏（1968-），男，硕士研究生，高级工程师，研究方向为气候预测和气候变化. E-mail：357391961@qq.com
通讯作者：张冬峰. E-mail：2619642@qq.com

湿润化趋势。

山西简称“晋”，位于 110.23° ~ 114.55°E 和 34.56° ~ 40.73°N，总面积 15.67×10^4 km^2，地处黄土高原东部，大部分地区海拔在 1 000 m 以上（图 1），与其东侧海拔不到 100 m 的华北大平原和西侧海拔 1 000 m 左右的黄河峡谷两岸的高原对比，呈现强烈的整体隆起态势，境内谷岭交错，地形复杂，东有太行山，西有吕梁山，中部有多个断陷盆地，山区面积占总面积的 80%；气候分类属温带大陆性季风气候，四季分明，干湿区划属半干旱半湿润气候区[18]，旱灾频发。由于处于东亚季风北缘，受东亚季风强弱年际变化的影响较大，生态环境十分脆弱[19-20]，地表干湿状况对当地的农林牧业生产、生态环境建设有重要的影响，如晋西北的“小老树”现象。本文利用 1961—2017 年山西省 67 个台站观测资料，分析山西省地表干湿状况的长期变化，揭示了干燥度与影响因子之间的关系，不仅有助于干旱研究，结果可用于指导农牧业生产、林业生产规划、晋西北的荒漠化治理和生态环境建设等。

1 资料与方法

1.1 资料

本文使用的 67 个气象站资料来自山西省气象信息中心，已经过质量控制，包括 1961—2017 年日最高气温、日最低气温、日平均风速、日照时数、日平均相对湿度和年降水量，以及台站经纬度和海拔高度。原始资料预处理和站点选择大致过程：首先剔除迁站垂直高差过大的五台山站，剩余的 108 站资料参与日蒸散量的计算，只要有一个要素缺测或无观测，日蒸散量被置为缺测，根据年份缺测情况选出 67个站（图 1）。出于考虑站点空间分布均匀性，

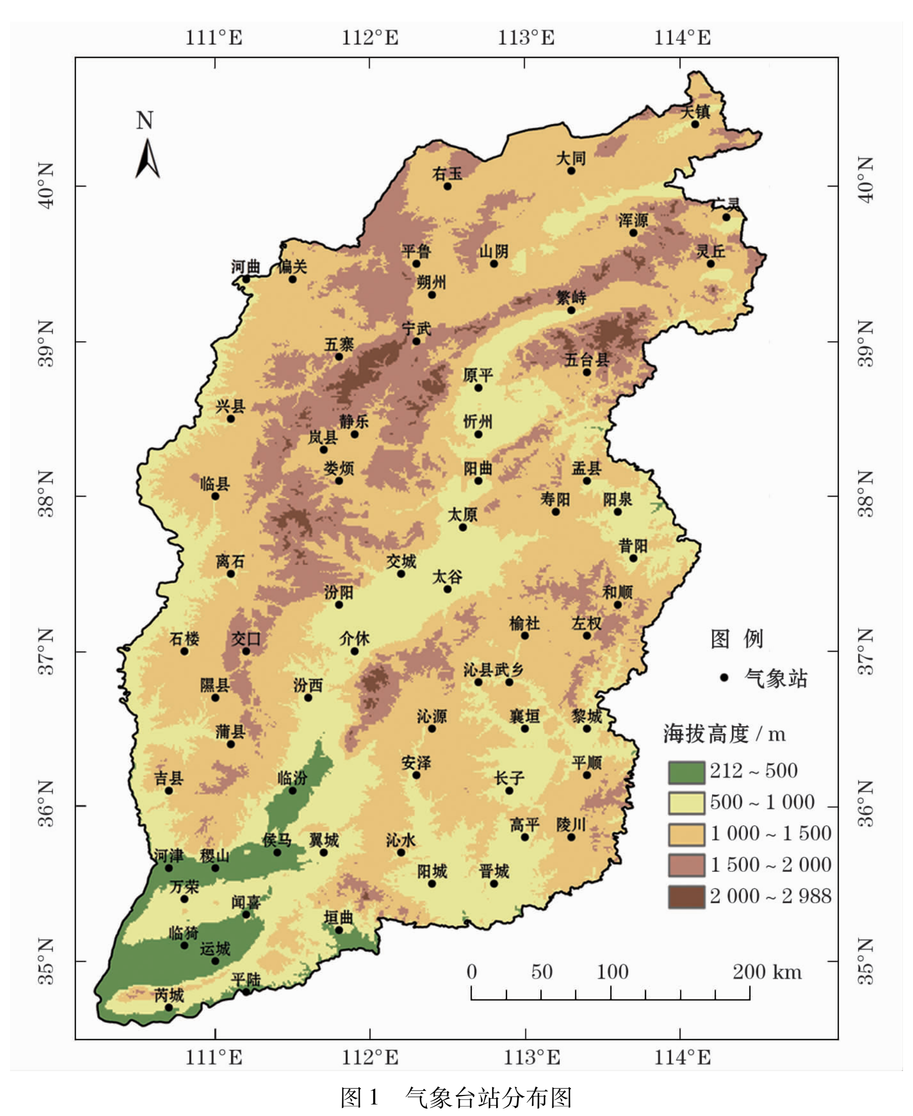


图 1 气象台站分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations

剔除神池、清徐、祁县和洪洞4站,增加汾西、长子、交口和娄烦4站,由于4站建站年代较晚,其年份分别为1972年、1971年、1977年和1974年,无资料年份通过与邻近站点的相关分析(相关系数均通过$\alpha=0.001$显著性水平检验)和回归补全。

1.2 方法

方法主要包括趋势分析、相关分析、偏相关分析和基于 FAO Penman-Monteith 模型的干燥度指数(Aridity Index,简写为*AI*)等。首先计算日潜在蒸散量,并累计为年值,然后计算其与年降水量的比率,得到年干燥度指数。用趋势系数进行干燥度趋势分析[20]。在偏相关分析时用了偏相关系数;所谓偏相关系数,就是在依变量与多个自变量都存在相关时,如果要考察其中一个变量与依变量的相关,先把其他变量对这个自变量本身及依变量的线性影响去除,然后计算它们的相关系数[21]。

1.2.1 干燥度 年干燥度为年潜在蒸散量与年降水量的比值[22],其公式为:

$$D=\frac{PE}{R} \tag{1}$$

式中:D为年干燥度($\mathrm{mm\cdot mm^{-1}}$);PE为年潜在蒸散量(mm);R为年降水量(mm)。

1.2.2 潜在蒸散量 本文采用 FAO Penman-Monteith 方法计算各站日潜在蒸散量(参考作物蒸散量),并累加计算年潜在蒸散量,用于计算年干燥度。

用 FAO Penman-Monteith 方法计算日潜在蒸散量公式为[23-24]:

$$PE=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \tag{2}$$

式中:PE为潜在蒸散量($\mathrm{mm\cdot d^{-1}}$)(即参考作物蒸散量);Δ为饱和水汽压曲线斜率($\mathrm{k\cdot Pa\cdot ℃^{-1}}$);$R_n$为作物表层净辐射($\mathrm{MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}}$);$G$为土壤热通量($\mathrm{MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}}$)(计算日潜在蒸散量时$G\approx 0$);$\gamma$为干湿表常数($\mathrm{kPa\cdot ℃^{-1}}$);$u_2$为2 m高度处风速($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$);$e_s$为饱和水汽压(kPa);$e_a$为实际水汽压(kPa)。各参数或物理量计算公式如下:

日平均气温:

$$T=\frac{T_{max}+T_{min}}{2} \tag{3}$$

式中:T_{max}为日最高气温;T_{min}为日最低气温。

饱和水汽压曲线斜率:

$$\Delta=\frac{4\,098\times\left[0.610\,8\times\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2} \tag{4}$$

作物表层净辐射:

$$R_n=(1-\alpha)R_s-4.903\times10^{-9}\left[\frac{T^4_{max,K}+T^4_{min,K}}{2}\right](0.34-0.14\sqrt{e_a})(1.35\frac{R_s}{R_{so}}-0.35) \tag{5}$$

式中:α取0.23;太阳辐射(短波辐射)$R_s=(a_s+b_s\times n/N)R_a$($a_s$和$b_s$为回归系数;$n$为日照时数;可日照时数$N=24\omega_s/\pi$);$T^4_{max,K}$和$T^4_{min,K}$为最高和最低绝对温度(K);$e_a$实际水汽压;晴空太阳辐射$R_{so}=(0.75+2\times10^{-5}z)R_a$(球外辐射$R_a=24\times60/\pi\times0.082\times d_r(\omega_s\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s)$。其中,日地平均距离$d_r=1+0.033\cos(2\pi J/365)$,日出时角$\omega_s=\cos^{-1}(-\tan\varphi\tan\delta)$,$\varphi$为纬度(弧度),太阳磁偏角$\delta=0.408\sin(2\pi J/365-1.39)$。这里$J$为日序,1到365或366,1月1日取日序为1)。

干湿表常数:

$$\gamma=0.665\times10^{-3}\times101.3\times\left(\frac{293-0.006\,5z}{293}\right)^{5.26} \tag{6}$$

2 m高度风速:

$$u_2=u_{10}\frac{4.87}{\ln(67.8\times10-5.42)} \tag{7}$$

饱和水汽压:

$$e_s=0.610\,8\times\left[\frac{\exp(\frac{17.27T_{max}}{T+237.3})+\exp(\frac{17.27T_{min}}{T+237.3})}{2}\right] \tag{8}$$

实际水汽压:

$$e_a=RH\times e_s \tag{9}$$

FAO 推荐$a_s=0.25$和$b_s=0.50$,本文取$a_s=0.173$和$b_s=0.553$(祝昌汉[25])。

文中年代际划分:1961—1970年为1960年代,1971—1980年为1970年代,1981—1990年为1980年代,1991—2000年为1990年代,2001—2010年为2000年代,2011—2017年7 a且称为2010年代。累年值统计时段为1981—2010年。

2 结果分析

2.1 干湿区划分标准分析

山西省1981—2010年年干燥度在1.52~2.89

之间(图2a)。由图可见,2.0等值线北起东北部忻定盆地东缘的五台县,南止于中条山中段的平陆县,途经太原盆地东缘、临汾盆地东缘、运城盆地东缘。此分界线与夏季平均降水量270 mm等值线(图略)基本重合,因而以年干燥度指数2.0为分界线呈现的山西省干湿区分布也是季风边缘带的体现[19]。在夏季,边缘带南侧为西南夏季风,在其北侧的西风带则为西南偏西风,但夏季风的水汽输送相对西风带更大[20]。另外,图2a中的干燥度指数2.0等值线与张存杰等[8]的1981—2010年全国干湿气候分区图山西省境内亚湿润区和亚干旱区分界线基本重合,同《山西气候》[18]中的半湿润区和半干旱区分界线基本重合,和山西植被指数分界线也基本重合[26-27]。本文将年干燥度指数2.0作为半干旱与半湿润区的界限值,从界限值来看,和国内诸多作者基于FAO Penman-Menteith方法干湿区划分的界限值等同[23,28]。

2.2 变化趋势

由图2b可见,近57 a山西省年干燥度呈现为北部和东南部减小,西南部增大的趋势,其中北部变湿和西南部变干趋势较为明显,但大部分站点未通过显著性检验(95%信度)。呈现的变化趋势对处于半干旱区的山西省北部地区的农业生产和生态环境建设十分有利,同时呈现变干的西南部农业干旱会增多。

2.3 干燥度年际和年代际变化

2.3.1 时间变化 由近57 a山西省区域平均干燥度指数逐年变化图可见(图3a),2000年以前干燥度指数呈波动增加趋势,年际振幅较大;2000之后干燥度指数呈波动减小趋势,年际振幅变小;最大值3.7出现在1965年,最小值1.2出现在1964年。从年代际平均来看,干燥度指数在1990年代最大,随后逐渐减少。图3b和3c分别给出近57 a山西省区域平均降水量和潜在蒸散量的逐年变化。降水量的年际和年代际变化同干燥度指数呈现明显的反相关关系,1990年代降水量最少,随后逐渐增加。年潜在蒸散量在1980年以前,呈增加趋势,之后减少,1981—2010年年代际均值约稳定维持在900 mm,2010年以后呈增加趋势。总体而言,与年潜在蒸散量相比,年干燥度指数的变化受年降水量变化影响更大。

2.3.2 空间变化 从干燥度空间分布的年代际变化(图4)可以看出,不同年代半干旱与半湿润区的分布范围有一定的差异,主要分为2个阶段,以

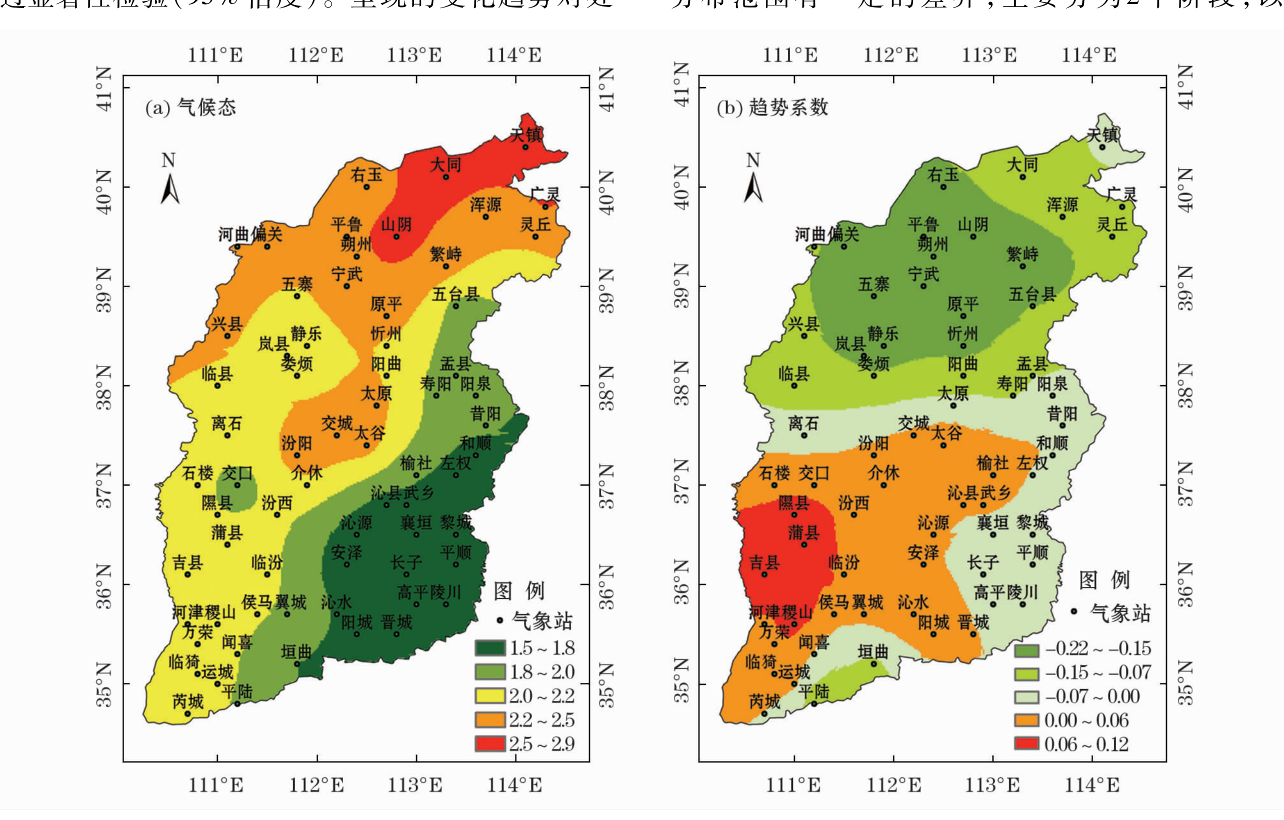


图2 年干燥度气候态、趋势系数

Fig. 2 Annual aridity index climatology and trend

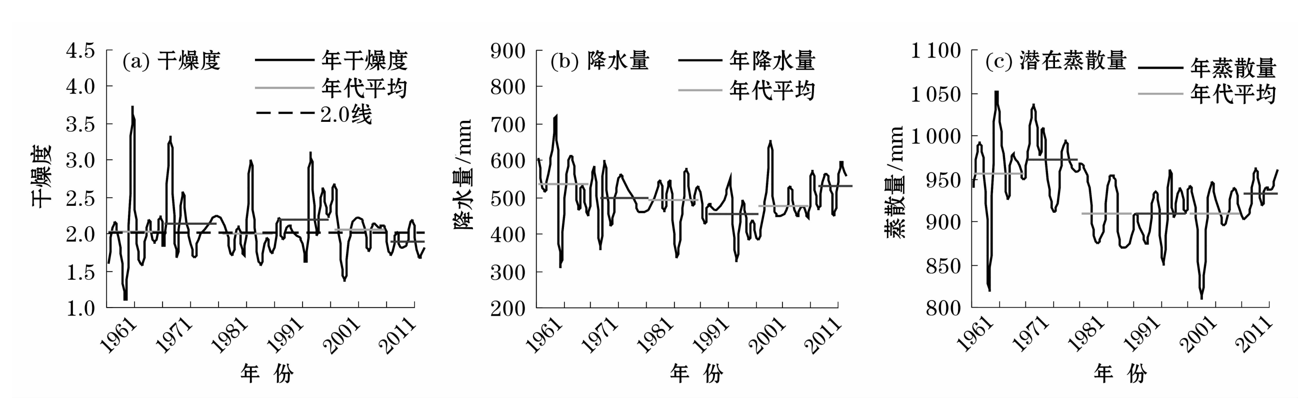


图 3 1961—2017 年山西省干燥度、降水量和蒸散量变化图

Fig. 3 Variations of aridity index, precipitation and potential evapotranspiration in Shanxi Province from 1961 to 2017

图 4 山西省干燥度空间分布年代际变化图

Fig. 4 Interdecadal variations of distribution of annual aridity index in Shanxi Province

1990 年代为界,前期由湿变干,其后由干变湿。1990 年代半干旱区范围最大,全省半湿润区位于山西境内东南部;2010 年代半干旱区范围最小,除北部部分和西南部局部地区,其余大部均达到半湿润标准,全省湿润化趋势明显。

出于定量化考虑,计算了干湿区面积。从年代际半干旱区面积演变来看(表 1),1960—1990 年代基本为扩大趋势,1990—2010 年代为减小趋势。1990 年代半干旱区面积达最大为 11.4×10^4 km^2,占全省总面积的 72.9%;2010 年代半干旱区面积达最小为 3.6×10^4 km^2,占全省总面积的 22.8%。半湿润区面积呈现相反的演变趋势,1990 年代以后,山西大部干旱化趋势结束,湿润化趋势明显。丁文广等[29]研究了晋西北地区沙漠化变化趋势表明,1975—1995 年以稳定型为主,1995—2005 年以发展型为主,而 2005—2014 年以逆转型为主,这与本文的干燥度变化趋势一致。干湿状况是沙漠化变化趋势的重要影响因子。

2.4 干燥度与气象因子关系分析

由图 3 可见,干燥度变化同时受降水量和潜在蒸散量变化的影响。如 2000 年之后潜在蒸散量为增加趋势,但由于降水量的增加,干燥度呈减小趋势。降水量在 1990 年代前呈减少趋势,之后为增加趋势,由于潜在蒸散量的作用,1990 年代前干燥度的年代际变化并没有随降水变化。

为了更清晰的反映各个因子对干燥度的影响,本文分别采用相关系数和偏相关系数,分析降水量以及影响潜在蒸散量的相对湿度、最高气温、最低气温、平均风速和日照时数对干燥度的影响。表 2 给出干燥度与各因子间相关系数和偏相关系数,从相关系数来看,干燥度同降水量、蒸散量、相对湿度和日照时数通过了 0.001 的显著性水平检验,最高气温通过了 0.05 的显著性水平检验,其余因子相关不显著;从偏相关系数来看,降水量和蒸散量通过了 0.001 的显著性水平检验,其余因子未通过显著性检验。从影响潜在蒸散量的因子来看(表3),不论是相关系数还是偏相关系数,相对湿度、平均风速和日照时数通过了 0.001 的显著性水平检验,而最高气温和最低气温相关不显著。由此可以得出,降水量和蒸散量均对干燥度有显著影响,且降水量与干燥度的相关性大于蒸散量,而相对湿度、平均风速和日照时数通过影响蒸散量而作用于干燥度,最高和最低气温同干燥度或蒸散量的相关性均不显著。

表 1 山西省各年代半湿润/半干旱区面积

Tab. 1 Area of semiarid zone and semihumid zone in Shanxi Province from 1960 to 2010s

分区	面积	1960 年代	1970 年代	1980 年代	1990 年代	2000 年代	2010 年代
半湿润区	面积 / $10^4 km^2$	7.5	6.6	7.7	4.2	6.0	12.1
	占总面积百分比 / %	48.2	42.5	49.2	27.1	38.2	77.2
半干旱区	面积 / $10^4 km^2$	8.1	9.0	7.9	11.4	9.7	3.6
	占总面积百分比 / %	51.8	57.5	50.8	72.9	61.8	22.8

表 2 干燥度与各因子间相关系数和偏相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient and partial correlation coefficient between aridity and meterological factor

系数	降水量	蒸散量	相对湿度	最高气温	最低气温	平均风速	日照时数
相关系数	-0.919**	0.619**	-0.586**	0.281*	-0.188	0.117	0.515**
偏相关系数	-0.888**	0.635**	-0.201	-0.105	0.145	0.076	0.253

注:* 表示通过 0.05 的显著性水平检验,** 表示通过 0.001 的显著性水平检验

表 3 蒸散量与各因子间相关系数和偏相关系数

Tab. 3 Correlation/partial correlation coefficient between potential evapotranspiration and meterological factor

系数	相对湿度	最高气温	最低气温	平均风速	日照时数
相关系数	-0.741**	0.195	-0.213	0.671**	0.774**
偏相关系数	-0.551**	0.194	0.153	0.536**	0.453**

注:* 表示通过 0.05 的显著性水平检验,** 表示通过 0.001 的显著性水平检验

3 讨 论

本文利用最新的气候资料,研究了山西省干湿时空变化,得到了山西大部 2000 年以来为明显的湿润化趋势,特别是在北部的半干旱区,有别于前人早期的干旱化趋势研究结论。

在计算方法上,毛飞等[22]曾提出在计算太阳辐射时,如何确定 a_s、b_s 系数,其取值对蒸散量计算结果有较大影响。作者比较了 FAO 推荐值 $a_s=0.25$,$b_s=0.50$ 和祝昌汉给出的适用值 $a_s=0.173$,$b_s=0.553$时山西省各站 1981—2010 年年干燥度范围;FAO 计算值在 1.63 ~ 3.02 之间,祝昌汉值在1.52 ~ 2.89 之间,差值范围在 0.1 ~ 0.17 之间,平均 0.125。本文采用了祝昌汉值,因其采用年干燥度 2.0 的界限值划分山西省半干旱和半湿润区与已有研究成果吻合。因此,利用现有的辐射观测站资料,深入研究 a_s、b_s 系数仍然十分必要。

干燥度指数的气象影响因子在不同地区可能存在差异,如韩宇平等[5]分析华北平原干燥度的影响因子按作用大小排序为降水量、日照时数、平均风速、平均气温,与本文的研究有一定的差异,其原因可能源于地理地貌的不同(如山区和平原)。

4 结 论

(1) 以基于 FAO Penman-Monteith 方法的干燥度指数 2.0 为标准,山西省可划分为西北部半干旱区和东南部半湿润区,其分区与植被覆盖度吻合,这种分布主要受西风带降水和季风降水的影响。

(2) 1961—2017 年山西省北部和东南部的部分地区呈现变湿趋势,对农业生产和生态环境建设十分有利;西南部大部呈现变干趋势,不利于农业生产。

(3) 从全区时间变化趋势来看,干燥度指数在 1960—1990 年代呈波动上升趋势,之后呈下降趋势;降水量在 1990 年代前呈下降趋势,之后呈上升趋势;蒸散量的变化分 3 个阶段,1960—1970 年代为上升趋势,1980—2000 年代为较为稳定,之后呈增加趋势。

(4) 干湿区界限经历了 1960—1990 年代的东南向位移和之后的西北向位移 2 个阶段,相应的干旱区面积占总面积的比例由 52% 扩展到 73% ,之后缩减到 23% 。

(5) 降水量和蒸散量均对干燥度有显著影响,且降水量与干燥度的相关性大于蒸散量,而相对湿度、平均风速和日照时数通过影响蒸散量而作用于干燥度,最高和最低气温同干燥度或蒸散量的相关性均不显著。

(6) 晋西北沙漠化年代际变化趋势与干燥度变化趋势一致,干湿状况可能是晋西北沙漠化变化趋势的重要影响因子。

参考文献(References)

[1] IPCC. Climate Change 2013:The Physical Science Basis. Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2014:161.

[2] 张林. 2018 年中国气候变化蓝皮书发布[N]. 中国气象报,2018 -4 -4(1). [ZHANG Lin. Release of China's blue paper on climate change in 2018[N]. China Meteorological Daily,2018 -4 -4(1).]

[3] 张祖光,郝卫平,李昊儒,等. 山西省春玉米生育期干旱特征分析[J]. 中国农业气象,2015,36(6):754 -761. [ZHANG Zuguang,HAO Weiping,LI Haoru,et al. Analysis on the drought characteristics in different growth stages of spring maize in Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2015,36(6):754 -761.]

[4] 代海燕,都瓦拉,王晓江,等. 基于 GIS 的内蒙古林业气候区划[J]. 干旱气象,2017,35(2):337 -341. [DAI Haiyan,DU Wala,WANG Xiaojiang,et al. Forestry climatic civision in Inner Mongolia based on GIS[J]. Journal of Arid Meteorology,2017,35(2):337 -341.]

[5] 韩宇平,张冰,黄会平,等. 华北平原干燥度指数时空分布特征及其影响因素分析[J]. 干旱区地理,2016,39(4):695 -703. [HAN Yuping, ZHANG Bing,HUANG Huiping,et al. Spatial-temporal characteristics of aridity index and its influencing factors in North China Plain[J]. Arid Land Geography,2016,39(4):695 -703.]

[6] 孟猛,倪健,张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报,2004,28(6):853 -861. [MENG Meng,NI Jian,ZHANG Zhiguo. Aridity index and its applications in geo-ecological study[J]. Acta Phytoecologica Sinica,2004,28(6):853 -861.]

[7] 刘宇峰,原志华,封建民,等. 基于地表湿润指数的 1959—2014 年陕西省地表干湿时空变化特征[J]. 干旱区地理,2016,39(6):1186 -1196. [LIU Yufeng,YUAN Zhihua,FENG Jianmin,et al. Dry-wet condition of Shaanxi Province in recent 56 years based on surface humidity index[J]. Arid Land Geography,2016,39(6):1186 -1196.]

[8] 张存杰,廖要明,段居琦,等. 我国干湿气候区划研究进展[J]. 气候变化研究进展,2016,12(4):261 -267. [ZHANG Cunjie,LIAO Yaoming,Duan Juqi,et al. The progresses of dry-wet climate division research in China[J]. Climate Change Research,2016,12(4):261 -267.]

[9] 申双和,张方敏,盛琼. 1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J]. 农业工程报,2009,25(1):11 -15. [SHEN Shuanghe,ZHANG Fangmin,SHENG Qiong. Spatio-temporal changes of wet-

ness index in China from 1975 to 2004[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(1):11－15.]

[10] 张庆云,陈烈庭. 近 30 a 来中国气候的干湿变化[J]. 大气科学,1991,15(5):72－81.[ZHANG Qingyun,CHEN Lieting. Dry and wet change of China climate in recent 30 years [J]. Scientia Atmospherica Sinica,1991,15(5):72－81.]

[11] 杨建平,丁永建,陈仁升,等. 近 50 a 来中国干湿气候界线的 10 年际波动[J]. 地理学报,2002,57(6):655－661.[YANG Jianping,DING Yongjian,CHEN Rensheng,et al. The interdecadal fluctuation of dry and wet climate boundaries in China in recent 50 years[J]. Acta Geographica Sinica,2000,57(6):655－661.]

[12] 王菱,谢贤群,李运生,等. 中国北方地区 40 a 来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J]. 地理研究,2004,23(1):45－54.[WANG Ling,XIE Xianqun,LI Yunsheng,et al. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years[J]. Geographical Research,2004,23(1):45－54.]

[13] 郑然,李栋梁. 1971—2011 年青藏高原干湿气候区界线的年代际变化[J]. 中国沙漠,2016,36(4):1106－1115.[ZHENG Ran,LI Dongliang. Decadal changes of the wet and dry climate zone boundaries in the Qinghai-Tibet Plateau during 1971－2011 [J]. Journal of Desert Research,2016,36(4):1106－1115.]

[14] 马柱国,符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报,2001,59(6):737－746.[MA Zhuguo,FU Congbin. Trend of surface humid index in the arid area of northern China[J]. Acta Meteorologica Sinica,2001,59(6):737－746.]

[15] 史建国,张燕卿,何文清,等. 黄河流域干燥度时空格局变化研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(1):242－247.[SHI Jianguo,ZHANG Yanqing,HE Wenqing,et al. Application and comparison of three meteorological drought indices[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2009,27(1):242－247.]

[16] 张红丽,张强,刘骞,等. 中国南方和北方气候干燥程度的变化特征及差异性分析[J]. 高原气象,2016,35(5):1339－1351.[ZHANG Hongli,ZHANG Qiang,LIU Qian,et al. Analysis on variation characteristics and differences of the climate drying degree between south and north of China[J]. Plateau Meteorology,2016,35(5):1339－1351.]

[17] 胡子瑛,周俊菊,张利利,等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报,2018,38(6):1908－1919.[HU Ziying,ZHOU Junju,ZHANG Lili,et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):1908－1919.]

[18] 郭慕萍,刘月丽,安炜,等. 山西气候[M]. 北京:气象出版社,2014:225－232.[GUO Muping,LIU Yueli,AN Wei,et al. Shanxi climate[M]. Beijing:China Meteorological Press,2014:225－232.]

[19] 张国宏,李智才,宋燕,等. 中国降水量变化的空间分布特征与东亚夏季风[J]. 干旱区地理,2011,34(1):34－42.[ZHANG Guohong,LI Zhicai,SONG Yan,et al. Spatial patterns of change trend in rainfall of China and the role of east Asia summer monsoon [J]. Arid Land Geography,2011,34(1):34－42.]

[20] 张国宏,郭慕萍,赵海英. 近 45 a 山西省降水变化特征[J]. 干旱区研究,2008,25(6):858－862.[ZHANG Guohong,GUO Muping,ZHAO Haiying. Study on the change of precipitation in Shanxi Province since recent 45 years[J]. Arid Zone Research,2008,25(6):858－862.]

[21] 屠其璞,王俊德,丁裕国,等. 气象应用概率统计学[M]. 北京:气象出版社,1984:246－249.[TU Qipu,WANG Junde,DING Yuguo,et al. Probability and statistics on meterological application [M]. Beijing:China Meterological Press,1984:246－249.]

[22] 毛飞,孙涵,杨红龙. 干湿气候区划研究进展[J]. 地理科学进展,2011,30(1):17－26.[MAO Fei,SUN Han,YANG Honglong. Research progress in dry/wet climate zoning[J]. Progress in Geography,2011,30(1):17－26.]

[23] GB/T 20481－2017,中华人民共和国国家标准:气象干旱等级[S].[GB/T 20481－2017,National standard of the People's Republic of China:Grades of meteorological drought[S].]

[24] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,et al. Crop evapotranspiration:Guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome,FAO Irrigation and drainage paper 56,1998.

[25] 祝昌汉. 再论总辐射的气候计算方法[J]. 南京气象学院学报,1982,5(2):196－206.[ZHU Changhan. Re-exploration of climatological calculation of total radiation[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology,1982,5(2):196－206.]

[26] 冯妍,何彬方,唐怀瓯,等. 安徽省 2000—2009 年不同类型植被的变化及其与气温、降水的关系[J]. 生态学杂志,2012,31(11):2926－2934.[FENG Yan,HE Bingfang,TANG Huaiou,et al. Variation patterns of different types of vegetation in Anhui Province of east China in 2000－2009 in relation to air temperature and precipitation[J]. Chinese Journal of Ecology,2012,31(11):2926－2934.]

[27] 党跃军,王礼霄,严俊霞. 山西省 2003—2012 年植被时空变化格局及对气候因子的响应[J]. 水土保持研究,2015,22(2):235－240.[DANG Yuejun,WANG Lixiao,YAN Junxia. Spatiotemporal dynamics of vegetation and its response to climate factors in Shanxi Province from 2003 to 2012[J]. Research of Soil and Water Conservation,2015,22(2):235－240.]

[28] 靳立亚,李静,王新,等. 近 50 a 来中国西北地区干湿状况时空分布[J]. 地理学报,2004,59(6):847－854.[JIN Liya,LI Jing,Wang Xin,et al. The temporal and spatial distribution of surface dry-wet conditions over Northwestern China in recent 50 years[J]. Acta Geographica Sinica,2004,59(6):847－854.]

[29] 丁文广,陈利珍,李丹璐,等. 1975—2014 年晋西北地区沙漠化动态变化趋势研究[J]. 干旱区地理,2016,39(5):994－1003.[DING Wenguang,CHNE Lizhen,LI Danlu,et al. Dynamic change trend of desertification in Northwest Shanxi Province during 1975－2014[J]. Arid Land Geography,2016,39(5):994－1003.]

Changes of dry/wet surfaces in Shanxi Province under global warming

ZHANG Guo-hong, ZHANG Dong-feng, ZHAO Yong-qiang, TIAN Guo-zhen, AN Wei

(*Climate Center of Shanxi Province*, *Taiyuan* 030006, *Shanxi*, *China*)

Abstract: Shanxi Province, China is located between 110.23° – 114.55°E and 34.56° – 40.73°N and has a total area of approximately 15.67×10^4 km^2; it is located on the eastern Loess Plateau of China, with altitude mostly more than 1 000 m above sea level. Shanxi Province has a temperate continental monsoon climate with distinct seasons and is a semiarid and semihumid zone according to the dry-humid climate zones. Located in the northern margin of the East Asian monsoon, it is greatly affected by the interannual variation of the intensity of the East Asian monsoon, which causes frequent drought disasters and creates a fragile ecological environment. The surface dry/wet conditions exert important effects on local agriculture, forestry, and animal husbandry production. For these reasons, by using statistical methods, the temporal and spatial characteristics of the aridity index (*AI*), interdecadal changes of dry/wet areas were analyzed, and relationships between surface dryness and meteorological factors were investigated on the basis of *AIs* calculated by the modified Penman-Monteith model of the Food and Agriculture Organization of the United Nations; this study used meteorological observation data from 67 stations in Shanxi Province from 1961 to 2017. Quality controlled data obtained from the Shanxi Meteorological Information Center were used, including annual precipitation, daily maximum and minimum temperatures, average wind speed, sunshine hours, and relative humidity from 1961 to 2017; the data for the longitudes, latitudes, and altitudes of stations were also used. The statistical methods used mainly include trend analysis, Pearson correlation analysis, and partial correlation analysis. The results can be summarized as follows: (1) Based on an annual *AI* of 2.0, Shanxi Province can be divided into semiarid and semihumid zones, which are in good agreement with the observed vegetation coverage. (2) The northern and southeastern parts of Shanxi Province show a wetting trend, while most of the southwest shows a drying trend. (3) The *AIs* show an overall increasing trend from the 1960s to the 1990s, followed by a decreasing trend; precipitation levels exhibit an opposite trend, and the changes in evapotranspiration are divided into three stages, namely an upward trend from the 1960s to the 1970s, almost no trend from the 1980s to 2000, and then an upward trend after 2000. (4) The boundaries of semiarid and semihumid lands move to the southeast from the 1960s to the 1990s and move northwest after the 1990s; the corresponding proportions of the total area of semiarid areas expand from 52% to 73% and then decrease to 23%. (5) Both precipitation and evapotranspiration exhibit prominent effects on aridity, and the correlation of precipitation with dryness is greater than with evapotranspiration. Relative humidity, average wind speed, and sunshine hours affect dryness via evapotranspiration. The correlations between maximum/minimum temperatures and dryness/evapotranspiration are not significant. (6) The interdecadal trend of desertification in northwest Shanxi is consistent with dryness. These changes imply that the dry/wet condition is an important factor affecting desertification. The major difference from previous studies is the shift from drying to wetting. Our conclusions can be used to guide agricultural and animal husbandry production, forestry production planning, desertification control, and ecological environmental construction, especially in northwest Shanxi. A key problem to be solved is the accurate estimation of solar radiation in areas with no radiation observations and a modification of the Penman-Monteith formula for different types of reference crops or land use types to render the calculated evapotranspiration values suitable for different surfaces. In the future, it will be helpful to guide agricultural production, ecological environmental construction, and desertification control to establish an index similar to dryness and to define a threshold that can accurately depict the spatial distribution of the vegetation extent or desertification.

Key words: FAO Penman-Monteith; aridity; climate; Shanxi